

# De Dutch Open Telescope. I: Inleiding

Rob Rutten

**Dit is het eerste deel van een serietje idioterieën over zonnetelescop**en met de “Dutch Open Telescope” als leidraad. De DOT (Fig. 1) is een nieuwe zonnetelescoop van Utrechtse makelij die momenteel wordt geïnstalleerd op het Canarische eiland La Palma. Het ontwerp ervan is revolutionair: de eerste telescoop waarin wordt geprobeerd maximale beeldscherpte te krijgen door de wind dwars door de kijker te laten waaien. Deze inleiding plaatst dit principe in de algemene context van optisch zonneonderzoek en de navenante eisen aan zonnetelescopen. In een volgend artikel zal ik de DOT in meer detail bespreken.

## Zonnewind

De zon verschilt niet van andere koele sterren behalve dat de aarde er vlak bij staat, op slechts 150 miljoen km afstand. Daardoor pronkt de zon als schijf aan onze hemel en niet als minuscule puntje zoals alle andere sterren. De eerstvolgende ster, Proxima Centauri, staat op  $4 \times 10^{13}$  km — driehonderdduizend keer zo ver weg, niet oplosbaar met zelfs de grootste telescoop en kleiner dan het kleinste detail dat we op de zon kunnen onderscheiden.

Omdat de zon de enige ster is die we van nabij kunnen zien is het ook de enige ster waarvan allerhande verschijnselen en processen in detail kunnen worden bestudeerd. De zon voldoet in haar goedertierenheid behulpzaam aan deze randvoorwaarde door een immense rijkdom aan structuren en processen te tonen op een veelvoud van schalen, volop voer voor vele generaties astrofysici. Voor een groot deel is deze rijkdom te danken aan het magnetisch veld van de zon. Dat is geen glad dipoolachtig veld zoals dat van de aarde, maar een complexe kluwen van “fluxbuizen” die spaghetti-gewijs door de fotosfeer (de schil waar het zonlicht ontsnapt) naar buiten prikken. Een onbegrepen dynamo in het zonsinwendige maakt ze door combinatie van de zonnerotatie en de turbulente convectie waarmee de zon haar fusie-energie naar buiten transporteert, in de welbekende maar eveneens onbegrepen 22-jarige activiteitscyclus. Dynamische verstoringen van, in en langs de fluxbuizen dumpen zoveel energie in de corona dat de temperatuur ervan oploopt tot een paar miljoen graden, genoeg om voldoende compenserende Röntgenstralingsverlies te genereren — een super-broeikaseffect. De hoge temperatuur levert een continu gaslek in de vorm van de supersone zonn

wind, of zijn modulatie van de kosmische straling, beïnvloedt het aardse klimaat door modulatie van de jet stream patronen. Dit feit vormt momenteel in de VS de voornaamste smoes om zonnewind aan de politiek te verkopen. “Space weather” is daar nu de slogan, zon-aarde relaties inclusief het uit hun baan blazen van satellieten. Zonnewind als redder van de mensheid! Op de dag dat ik dit schrijf kan ik op de SOHO home page (<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>) een stormmelding aanklikken: de vanmorgen waargenomen CME (Coronal Mass Ejection) wordt vanavond hier verwacht — bukken bij het naar huis fietsen?

Zon-aarde relaties hebben in Utrecht een oude traditie, begonnen met Buys Ballot en in onze tijd voortgezet door Cor Schuurmans van het IMAU, maar in Europa wordt zonnewind toch nog vooral verkocht als pure wetenschap van astrofysische snit. Dan gaat het niet alleen om

het begrijpen van het hoe en waarom van zon-achtige sterren, maar veel algemener om fysische structuren en processen die gemeengoed zijn in het heelal, die niet nabootsbaar zijn in aardse laboratoria, maar die wel toetsbaar zijn aan het detail dat de zon ten toon spreidt. Dus gebruik van de zon als een astrofysische steen van Rosetta, met name voor stralingsprocessen, gasdynamica, magnetohydrodynamica en plasmafysica. Voorbeeld: de groep van Hans Goedbloed op het FOM-lab voor plasmafysica te Rijnhuizen gebruikt de zon als aanvulling op tokamaks om plasmafysische structuren en processen te doorgronden<sup>1</sup>. Omgekeerd verrijken de numerieke analysemethoden die voor en met de laboratoriumexperimenten ontwikkeld worden de zonnefysica en de astrofysica in het algemeen. Het vak wordt behoorlijk op z'n kop gezet door numerieke simulaties die veel realistischer topologieën en dynamische afwijkingen van evenwichtssituaties beschrijven dan vroeger analytisch mogelijk was. Numeriek modelleren verandert kwalitatieve astrofysica in kwantitatieve astrofysica. De zonneverschijnselen vormen daarin een belangrijke link.

## Drie revoluties

De Utrechtse traditie in zonneonderzoek begon met het werk van W.H. Julius (neef van V.A. Julius van het Juliusinstituut) en werd door M.G.J. Minnaert en medewerkers uitgebreid tot vruchtbare deelname aan de eerste sterrekundige revolutie van deze eeuw: de overgang van astronomie op astrofysica. Dit werk betrof vooral de vorming van spectraallijnen en hun gebruik als astrofysische meetinstrumenten. De klemtoon lag vooreerst op het zonnenspectrum, zoals bij zoveel sterrekundige ontwikkelingen gebruik makend van de relatief grote fotonflux die de zon ons biedt.

De naoorlogse sterrekundige revolutie betrof de openlegging van het electromagnetische spectrum met radiotelescopen en satellietinstrumentatie. Hierin concentreerde het Utrechtse onderzoek, onder leiding van C. de Jager, zich wederom op de zon. De hoogtepunten waren 60-kanaals radiospectrometrie met de 25-m spiegel te Dwingeloo en zonnevlamwaarnemingen met de HXIS Röntgenkijker aan boord van de Solar Maximum Mission. Beiden inspireerden aanzienlijke theorievorming in een reeks Utrechtse proefschriften.

De derde revolutie komt er aan. Deze betreft het verkrijgen van voldoende ruimtelijke oplossing om de nieuwe “ogen” op het heelal ook scherp te krijgen. De sleutelterm is interferometrie, het benutten van faseinformatie om kleine telescopen over grotere basislengten coherent te combineren, ook op kortere golflengten dan in het radiodomein. In het laatste is fase makkelijk meetbaar en zijn de faseverstoringen door de dampkring klein. De Westerbork radiotelescoop synthetiseert z'n 14 25-m spiegels tot een ellipsvormige schijf van 3 km doorsnede door fasegetrouwe combinatie terwijl de aarde vanuit de bron gezien de rij spiegels ronddraait. Met de Europese Very Large Telescope in Chili (4 8-m spiegels plus een aantal kleinere) zal zoiets in het infrarood ook wel lukken, maar voor interferometrie op zichtbare en kortere golflengten moet de apparatuur buiten de aardse dampkring opereren. Ruimte-interferometrie vormt dan ook een van de hoofdpunten van het ESA programma voor het komende decennium.

---

<sup>1</sup>In Nederland wordt zonneonderzoek verricht op het Utrechtse Sterrekundig Instituut, het FOM Instituut te Rijnhuizen en de afdeling Space Science van ESA te Noordwijk. Er is voor zover ik weet geen Nederlands onderzoek aan de zonnewind en de magnetosfeer. Dat betekent dat geen Nederlandse onderzoeker direct werd gedupeerd door de lanceringsexplosie van de CLUSTER-missie, maar ook dat Nederland niet mee doet in de zojuist door ESA aanvaarde CLUSTER-II opvolger. Nederland is trouwens opvallend afwezig in al het ruimteonderzoek betreffende het zonnestelsel. Dat is jammer omdat ESA's lange-termijnplanning een accentverschuiving toont van sterrekunde (Röntgen-, ultraviolet- en infraroodobservatoria) naar planeten en kometen (missies naar Mercurius, Mars en de komeet Wirtanen). Fokker Space Systems zal in de bouw daarvan wel naar rato mogen meegenieten van de Europese fondsen, maar de Nederlandse wetenschap profiteert niet van deze aanzienlijke investeringen. Ruwweg de helft van wat de Nederlandse belastingbetaler ophoest voor het Europese ruimteonderzoek gaat zo qua wetenschappelijk rendement naar de andere lidstaten.



Figuur 1: De Dutch Open Telescope, La Palma, september 1996. De telescoop is hier op de poolster gericht. Hij staat op een 15 m hoog platform nabij de 2400 m hoge Roque de Los Muchachos, temidden van een groeiend aantal telescopen waaronder drie UK/NL telescopen voor nachtsterrenkunde. De ontwerper, Rob Hammerschlag, staat halverwege in de lift. De slecht-weer koepeltent is weggekapt. De open structuur van telescoop en toren dienen om de passaatwind die de beste seeing op La Palma brengt minimaal te verstoren. Omdat de beste seeing komt bij harde wind (5–10 m/s, Bf 4–6) heeft Hammerschlag allerlei uitvindingen moeten doen om te zorgen dat de telescoop wel beweegbaar is maar niet in de wind wiebelt. Die nieuwe technologie vormt de reden waarom de Stichting Technische Wetenschappen de bouw en installatie van de DOT financiert. Uitvoerders zijn het Sterrekundig Instituut, de facultaire instrumentatiegroep (IGF) en de centrale werkplaats van de TU Delft. Deze zomer moeten de eerste beelden komen. Foto van Ed van der Zalm.

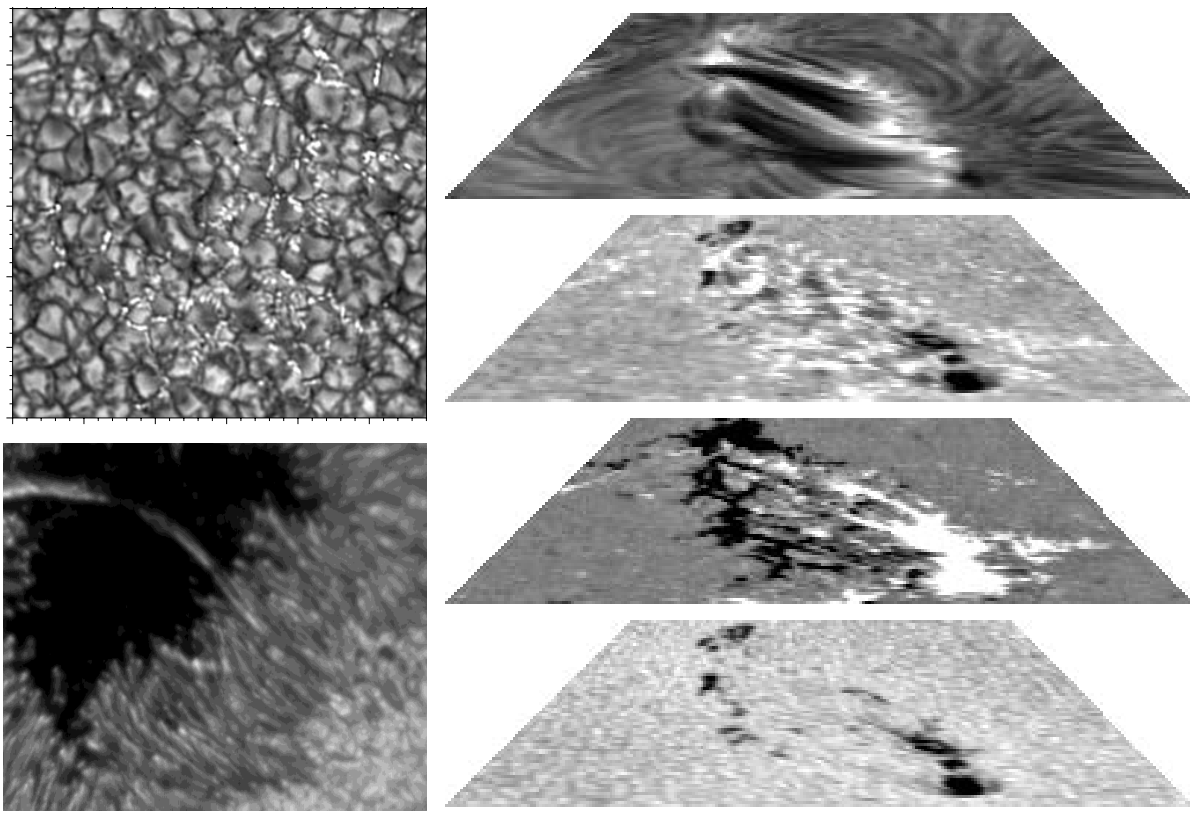
## Optische interferometrie

Op aarde wordt interferometrie op optische golflengten bemoeilijkt door de onrust van de dampkring. Turbulente wervels geven kleinschalige variaties in de brekingsindex; die leveren golffrontdeformaties, de zogenaamde “seeing”, die erger zijn bij kortere golflengten. Dat is de reden dat een amateurkijker met een diameter van 10 á 20 cm even scherpe beelden levert als veel grotere telescopen. De laatsten vangen alleen maar meer licht — tenzij je ze in de ruimte brengt, zoals de Hubble Space Telescope. Dat is echter een veel te dure operatie om telescopen op de grond overbodig te maken.

Ook in de optische zonnefysica wordt interferometrie een sleutelbegrip. Op optische golflengten kijk je dieper in de zon dan op andere golflengten<sup>2</sup>, juist tot op de bovenkant van

---

<sup>2</sup>In het optisch deel van het spectrum wordt de extinctie in het gas van de zonnefotosfeer geleverd door gebonden-vrij overgangen van het  $H^-$  ion, een rare en zeldzame verschijning van waterstof die koele sterren ondoorzichtig maakt omdat ze voornamelijk uit waterstof bestaan, aan hun buitenkant in atomaire vorm. Naar het infrarood komen daar de  $H^-$  vrij-vrij overgangen bij; op kortere golflengten de gebonden-vrij overgangen van “metalen” zoals  $CaI$ ,  $AlI$ ,  $SiI$  en  $FeI$ . Als je meer wilt weten ben je welkom op het 2e-jaars college NGSB. De mate van extinctie bepaalt hoe hoog in de zonneatmosfeer de straling ontsnapt. Omdat de zonne-extinctie juist in het optische gebied het kleinst is toont de zon zich aan onze ogen in haar kleinste gedaante — sterker nog, precies passend achter de maan. Vergeet niet nu al een vakantiereis te plannen in midden-Europa rond 11



Figuur 2: Magnetische structuren in de zonneatmosfeer. Beelden opgenomen met de SVST (Fig. 4). • Linksboven: hoge-resolutie opname van de granulatie. Schaal: 22 Mm ( $30''$ ) per zijde. Deze opname is gecorrigeerd voor de seeing (met phase diverse speckle interferometry ten koste van dagen rekentijd) zodat de scherpte de buigingsgrens van de 47 cm apertuur benadert ( $0.2''$ ). De kleine heldere puntjes in de donkere intergranulaire lanen markeren lokaties waar “fluxbuizen” van sterk magnetisch veld (150 mT) door het oppervlak steken. Opname uit het proefschrift van Tom Berger (Lockheed). • Linksonder: de penumbra van een zonnevlek. Schaal: 35 Mm ( $50''$ ) per zijde. De filamentaire structuren markeren complexe magnetische topologie met zowel horizontale als opwaarts hellende waaiers van fluxbuisbundels, geplooid zoals een veel-lagige tutu van een ballerina. Links overhuift een fluxbundel de umbra. Geplukt uit de Lockheed WWW gallery. • Rechts: tomografie van een actief gebied. Pseudo-perspectivische collage van een fotosferisch beeld (onder), het fotosferische magneetveld gemeten uit de Zeemansplitsing van een ijzerlijn, de intensiteit in het centrum van deze lijn (die straling ontsnapt wat hoger in de fotosfeer), en de chromosferische structuur getoond door de waterstof  $H\alpha$  lijn ( $\lambda = 656.3$  nm). Schaal: 54 Mm ( $75''$ ) per zijde. Omslagillustratie van Louis Strous’ proefschrift.

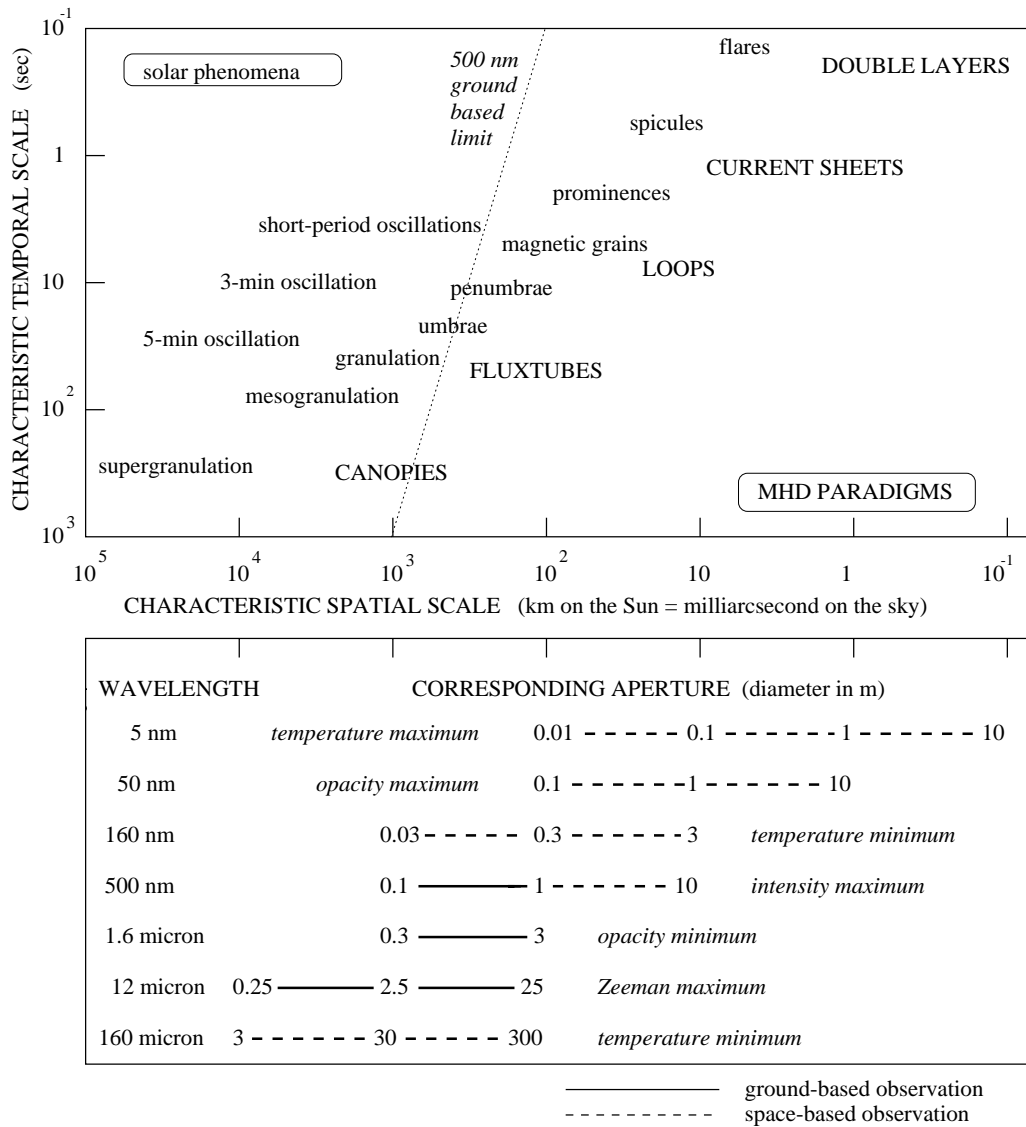
de convectiezone waarin het verlies van stralingsenergie aan de ruimte het convectieve energietransport afstopt, met vorming van de kleine pannekoekachtige granulen (Fig. 2).

Het merendeel van de zonneflux verlaat de zon in de vorm van zichtbaar licht in de fotosfeer. Deze laag is ook de overgang van het hydrodynamisch geregeerde inwendige naar de uitwendige atmosfeer waarin het magneetveld de baas speelt en oververhitting mogelijk is zonder koppeling aan de vrijelijk passerende energiestroom. Optisch zonneonderzoek dient daarom tot onderzoek van de basis die ten grondslag ligt aan de MHD structuren en plasmafysische processen in de hete buitenkant<sup>3</sup>.

---

augustus 1999 om dit wonderbaarlijke toeval uit te buiten. Een totale zonsverduistering is een overweldigend natuurverschijnsel. Partiële zonsverduisteringen, maansverduisteringen, sterrenregens en kometen vallen daarbij in het niet. AEsquadraatreis naar het strand van de Zwarte Zee?

<sup>3</sup>Ook dienen fotosferische metingen voor onderzoek van het zonsinwendige, de helioseismologie, maar dat is een verhaal apart. De kleurrijke geschiedenis van de helioseismologie heb ik al eens in een muziekspecial van de Vakidoot uit de doeken gedaan. Momenteel is dit vakgebied volwassen: er worden nu terabytes aan helioseismologische gegevens verzameld met een viertal netwerken van telescopen rondom de aarde en met de SOHO missie in het eerste Lagrangepunt tussen zon en aarde. Het wachten is op de eerste geloofwaardige



Figuur 3: Bovenste helft: karakteristieke schalen van zonneverschijnselen (kleine letters) en van de MHD paradigma's die bedacht zijn om ze te verklaren (hoofdletters). Veel verschijnselen zijn groter en leven langer dan hun waarden in deze grafiek; de getallen langs de assen geven de maten van de fysische structuren en processen die aan de verschijnselen ten grondslag liggen. Protuberansen (*prominences*) bijvoorbeeld zijn buitengewoon lange slierten maar bevatten draderige fijnstructuur die moet worden opgelost om te weten hoe ze werken. De gestippelde resolutielimiet loopt scheef omdat het moeilijker is lange tijdreeksen van hoge resolutie te vergaren dan losse beelden. (Voor de meeste verschijnselen moeten continue tijdreeksen verkregen worden, zeker voor de oscillaties, om voldoende Fourierresolutie te krijgen. Die wordt bepaald door de lengte van de meetreeks. SOHO levert nu ononderbroken sequenties van jaren lang, zonder dag/nacht onderbrekingen omdat hij in L1 zit. Ook is vaak een groot veld nodig. Meestal moeten allerlei diagnostieken worden gecombineerd — snelheden, intensiteit, sterkte en richting van het magnetisch veld, verschillende hoogtes in de zonneatmosfeer. De figuur is als pakket van eisen dus lang niet compleet.) Onderste helft: overeenkomende telescoopdiameters in meters, voor diverse golflengtes met speciale betekenis (college NGSB). De Röntgenstraling met  $\lambda = 5$  nm komt uit de corona; het temperatuurminimum tussen fotosfeer en chromosfeer wordt bemonsterd door het continuum op 160 nm en 1.6  $\mu\text{m}$ ; op 1.6  $\mu\text{m}$  (de zon heeft wat met 1.6) kijk je het diepste de zon in; bij 12  $\mu\text{m}$  zitten sterke MgI emissielijnen met relatief grote Zeemansplitsing. De streeplijnen geven aan waar plaatsing buiten de dampkring is vereist.

identificatie van de *g*-modes waarin het radiatieve inwendige van de zon wordt geacht te resoneren. Op de SOHO-workshop in juni te Oslo?

Figuur 3 geeft een schematisch overzicht van de verschijnselen in de zonsatmosfeer, met in de onderste helft de basislengte (telescoopdiameter, apertuur) die nodig is voor hun oplossing in hoekmaat. De scheve stippellijn geeft ruwweg de grens die op aarde bij goede seeing wordt bereikt. Links daarvan zijn de verschijnselen dus goed waarneembaar. Dat klopt: de granulatie en de vijf-minutentrilling zijn inmiddels goed begrepen verschijnselen. De chromosferische drie-minuten oscillatie is daar de laatste jaren bij gekomen — althans, dat vind ik, maar niet iedereen is het mij eens. Het front van onderzoek verschuift dus naar rechts, over de stippellijn. Het wordt bijvoorbeeld weer hoog tijd voor een Utrechts proefschrift over spiculen. Het laatste was dat van Jacques Beckers, nu directeur van de US National Solar Observatory, bij Minnaert in 1964. Daarna zijn er nauwelijks goede waarnemingen van verkregen, terwijl ze vermoedelijk een essentiële diagnostiek vormen voor het begrijpen van mechanisch energietransport tussen fotosfeer en corona.

Het is dus zaak de stippellijn naar rechts te laten verschuiven. Of eigenlijk is het al zaak de stippellijn meer frequent te laten gelden, want hij is ingetekend voor supergoede seeing en die komt maar zelden voor. Voorbeeld: vorig jaar had ik in een maand waarnemen met de Zweedse zonnetelescoop op La Palma maar twee dagen superseeing<sup>4</sup>. En dat terwijl La Palma seeing-wise bekend staat als een der beste plaatsen op aarde. Op de Pic du Midi treedt superseeing op als er in de zomer sneeuw valt — dat gebeurt slechts om de paar jaar.

### Eisen re beeldscherpte

Telescopen op aarde halen dus zelden een hogere hoekresolutie dan het intrinsieke scheidend vermogen van een 10–20 cm telescoop. Deze waarde wordt bepaald door de Fried parameter  $r_0$ : de effectieve apertuurdiameter geleverd door de seeing. Mits de telescoop groter is en bovendien volmaakt geeft  $r_0$  de bereikte beeldscherpte volgens het Rayleigh-criterium  $\Delta$  (in b'gsec) =  $0.1/r_0$  (in m). Ruwweg dus  $r_0 = 10 - 20$  cm op goede plaatsen, en grotere waarden  $r_0 > 20$  cm alleen bij superseeing, een zeldzaam fenomeen ook op de beste locaties zoals La Palma en Pic du Midi. Dat is niet veel. Hoe het onderste uit de kan te krijgen? Het volgende rijtje stappen ligt voor de hand:

- a) vind de beste plek op aarde, met veel zonneschijn en dan vaak maximale  $r_0$ ;
- b) bouw daar een buigingsbegrensde telescoop met diameter  $D \gg r_0$ ;
- c) zorg dat de telescoop en het telescoopgebouw de lokale  $r_0$  niet nadelig beïnvloeden;
- d) corrigeer het atmosferisch beeldbederf achteraf met computertrucs (image restoration);
- e) meet en corrigeer het atmosferische beeldbederf in real time (adaptive optics);
- f) vergeet alle bovenstaande stappen en plaats een grote zonnetelescoop buiten de dampkring.

Ieder van deze stappen is goed voor een lange Vakidioterie. De bovenvermelde Jacques Beckers is bijvoorbeeld druk bezig met stap *a* voor een toekomstige nieuwe Amerikaanse zonnetelescoop. Hij vergelijkt diverse lokaties in de VS en plaatste, met Rob Hammerschlag en Piet Hoogendoorn, afgelopen najaar een meetmast nabij de DOT op La Palma maar die is intussen alweer weggewaaid in een van de ijselijke ijsstormen die de Roque de los Muchachos 's winters teisteren. Beckers' meetmethode is nieuw en interessant. Aan de keus van La Palma liggen overigens twintig jaren van uitvoerige Europese seeingmeterij ten grondslag, waarin de Utrechters

---

<sup>4</sup>Gelukkig vielen die in de twee weken dat Luc Rouppe van der Voort zijn Astrovaria-studiepunten kwam halen. Met EU-subsidie omdat hij als Nederlander een Zweedse telescoop gebruikte. Luc heeft er een promotieplaats in Stockholm aan overgehouden.

C. Zwaan en C. de Jager een grote en somtijds romantische rol hebben gespeeld. De DOT is daar uit voortgekomen. Maar ook dat verhaal moet maar een andere keer, evenals stappen  $d$  en  $e$  die op dit moment in sterke ontwikkeling zijn — met name stap  $d$  is, in de vorm van *phase diverse speckle interferometry*, veelbelovend. Ook voor de DOT.

Stap  $f$  is natuurlijk het mooist maar ook veruit het duurst. Een lang verhaal kort gebracht is dat zo'n ruimtezonnentelescoop lang in NASA's planning heeft gezeten, als zonnefysische tegenhanger van de Hubble, maar definitief sneuvelde met de explosie van de Challenger. Nu is dat veel te duur. SOHO bevat waardevolle Röntgen- en ultraviolettelescop<sup>5</sup> maar haalt bij lange na niet de beeldscherpte die op de grond verkregen wordt.

Bij de DOT gaat het eerstens om stappen  $b$  en  $c$ . Hoe daaraan optimaal te voldoen? De DOT-oplossing, een open telescoop, is nieuw. Ik zet hem hier af tegen bestaande zonnetelescopen, met de aantekening dat de toekomstige Amerikaanse telescoop die Jacques Beckers probeert te verwezenlijken het voorbeeld van de DOT volgt. En, zoals gezegd, zonder hier op de details van de DOT in te gaan.



Figuur 4: Pasfoto's van Canarische zonnetelescopen in volgorde van apertuur. De gebouwgroottes corresponderen daar helemaal niet mee; in die maat zijn de GCT en VTT het grootst. Hun ontwerp dateert uit de tijd dat film als detector werd gebruikt; CCD's volstaan met kleinere beeldschaal. Er zijn op Tenerife nog een tiental andere zonnetelescoopjes voor specialistische doeleinden, vooral helioseismologie; dit zijn de algemeen inzetbare afbeelders. Ze zijn allemaal spierwit om lokale verhitting en turbulentie te vermijden. De DOT is duidelijk een buitenbeentje (ook in financieel opzicht: een koopje vergeleken bij de rest). Van links naar rechts: • DOT (Dutch Open Telescope), La Palma, apertuur 45 cm, gereed in 1997. Geschikt voor filtermagnetometrie met hoge oplossing. • GCT (Duitse Gregory Coud  Telescope), Tenerife, apertuur 45 cm. Vacuum reflector, vooral voor spectrografische magnetometrie. • SVST (Swedish Vacuum Solar Telescope), La Palma, apertuur 47 cm. Vacuum refractor met uitzonderlijk goede beeldscherpte. • VTT (Duitse Vacuum Tower Telescope), Tenerife, apertuur 70 cm. Algemene zonnetelescoop met uitgebreide postfocusapparatuur. • THEMIS (Frans-Italiaanse T lescope H liographique pour l'Etude du Magn tisme et des Instabilit s Solaires), Tenerife, apertuur 90 cm, gereed in 1997. Grote nieuwe-generatie telescoop speciaal voor spectrografische magnetometrie met hoge precisie.

## Optische zonnetelescopen

Zonnetelescopen zijn in principe gelijk aan sterretlescopen, maar in de praktijk zijn er grote verschillen. De zon is veel helderder dan een ster, een verschil van dag en nacht, zodat met een veel kleinere verhouding diameter/brandpuntsafstand kan worden volstaan. Zonnetelescopen zijn daarom meestal veel langer (tot 150 meter toe) maar kleiner in diameter (40–80 cm) dan sterretlescopen. Hun diameter is nog steeds aanzienlijk groter dan de Fried parameter van 10–20 cm op de beste sites (stap  $b$  — maar lang niet alle zonnetelescopen zijn buigingsbegrensd; de meeste sterretlescopen trouwens ook niet, zelfs de gerepareerde Hubble niet).

<sup>5</sup>Alsook een prima optische magnetograaf, de Michelson Doppler Interferometer, een ingenieus apparaat dat tegelijk beelden, snelheidskaarten en magnetogrammen van de zon produceert, met oud-Utrechter Karel Schrijver als project scientist voor de magnetometrie en met AIO Mandy Hagenaar, halfjaarlijks bij Lockheed in Palo Alto, als grootgebruikster. De Lockheedgroep probeert overigens een grotere ruimtetelescoop voor een prikje aan NASA te verkopen door inschakeling van een goedkope ex-spionagesatellietfabriek in StPetersburg.

De eerste eis waaraan zonnetelescopen moeten voldoen is die van zo hoog mogelijke beeldscherpte, dus stappen  $b$  en  $c$ . Daarnaast zijn er voor de hand liggende andere:

- $g)$  *de zon volgen met  $0.1''$  precisie.* Zonder wiebelen. Niet zo makkelijk met een kijkerbuis van tientallen meters; lange zonnetelescopen hebben een stilstaande kijkerbuis en gebruiken een heliostaat (een stel draaiende spiegels) om de de aardrotatie te compenseren;
- $h)$  *stilstaand zonsbeeld.* Bij een heliostaat draait het beeld gedurende de dag rond. Dat bemoeilijkt sequentiële spectrometrie omdat de te meten structuur over de ingangsspleet draait. De 100 m lange telescoop van de US National Solar Observatory op Sacramento Peak (NM) hangt daarom in een kwikbad en draait mee. Het kwik maakt hem wrijvingsloos roteerbaar — je kunt met je vinger z'n hele 300 ton rondduven. (Dat hebben mijn kinderen bij slecht weer vaak gedaan: papa, gaan we draaimolen spelen?);
- $i)$  *geen instrumentele polarisatie.* Dat gaat fout als er scheef op spiegels wordt geschenen, vooral op bewegende zoals die van een heliostaat. Wat wel mag is scheve spiegels gebruiken na het primaire focus als daarin de polarisatie-encoder zit waarmee polarisatie wordt omzet in intensiteitsmodulatie;
- $j)$  *slimme postfocus apparatuur.* Daarin valt veel te doen. Vloekristallen en andere nieuwe technologieën maken het mogelijk compacte en robuuste magnetografen te bouwen. Met optische fibers wordt het wellicht mogelijk spectrografen te voeden met een volledig twee-dimensionaal veld, zodat de nieuwe image restoration technieken ook in spectrometrie kunnen worden toegepast;
- $k)$  *slimme zonnefysici.* De zon verdient dat, anders is haar ruimschoots didactisch aanbod van astrofysische wetenswaardigheden slechts parels voor de (pest)zwijnen.

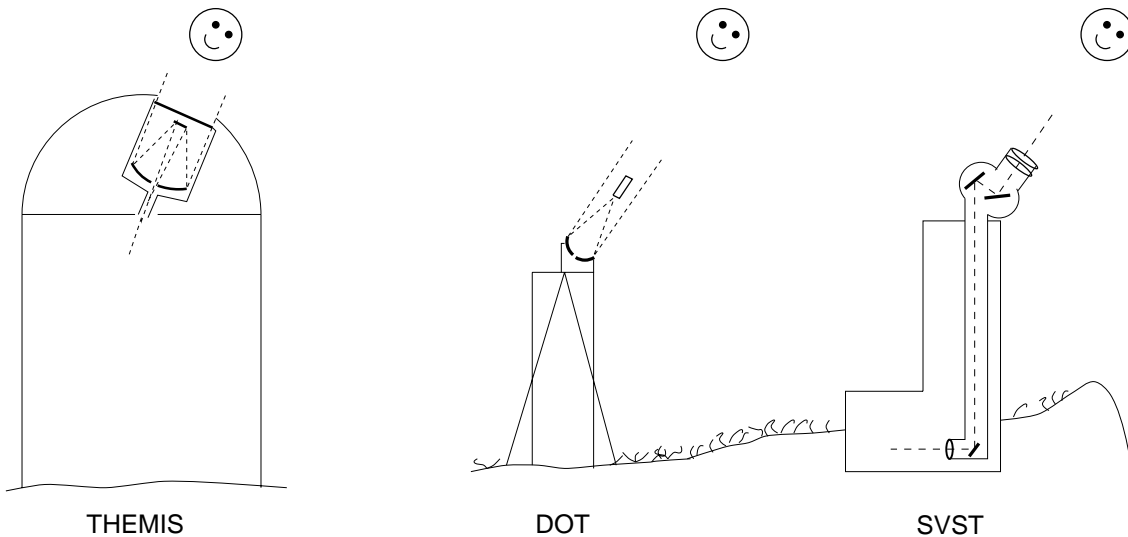
## THEMIS en SVST

Laat ik kort twee voorbeelden geven. THEMIS (Fig. 4) is een nieuwe Frans-Italiaanse zonnetelescoop die momenteel op Tenerife (ook een goede plek, stap  $a$ ) wordt voltooid. Net als de DOT is dit een al twintig jaar lopend project, maar wel veel groter en en héél veel duurder. De diameter is 90 cm. THEMIS is vooral bedoeld voor polarimetrie. Aan stap  $b$  wordt voldaan met een parabolische vangspiegel in een alt-azimuth opstelling met meeroterende postfocusapparatuur (Fig. 5). De telescoop is afgedekt met een glazen venster en wordt vacuumgezogen om te voldoen aan  $c$ : op die wijze kan er geen turbulentie ontstaan bij het focus waar de hete zonnestrallen bijeenkomen. De grootte van dit venster ligt op de grens van het haalbare. Grote vacuumvensters moeten sterk zijn om het drukverschil van één atmosfeer te weerstaan, maar dikke vensters bederven de beeldkwaliteit en dunne vensters bederven de polarimetrie door spanningen in het glas.

THEMIS heeft een meedraaiende koepel met een gat waar de telescoop precies op aansluit, zonder mechanisch contact. Zo kan er geen turbulente luchtstroom ontstaan; bij de meeste telescoopkoepels bederft de spleet de lokale seeing nabij de telescoop op funeste wijze. THEMIS is een buitengewoon ambitieus project. De hoofdspiegel is overigens al afgedankt omdat hij net zo sferisch aberreerde als de Hubble spiegel; een nieuwe is in de maak. Ik houd mijn hart vast wat betreft de rest: het ontwerp is erg ingewikkeld. De lichtweg telt meer dan twintig reflecties, veelal kromme, voordat de fotonen eindelijk de CCD's bereiken.

De Zweedse SVST op La Palma is een veel kleinschaliger zonn kijker maar het is wel de scherpste ter wereld. Het is een 22 m lange refractor waarbij de 47 cm lens tegelijk als vacuumafsluitvenster dient. De lens is een doublet dat zo is geslepen dat onder één atmosfeer drukverschil de juiste vorm wordt aangenomen. De telescoop is niet volmaakt buigingsbegrensd,





Figuur 5: Schetsen van THEMIS, DOT en SVST. De aperturen en telescoophoogtes boven de grond zijn ruwweg op vergelijkbare schalen; de telescopen, bouwwerken en bergellingen niet. THEMIS is een vacuumreflector met bijzonder complexe postfocusapparatuur, het hele gebouw vullend, die hier niet is getekend. De DOT is een open reflector. De geschetste doos voor postfocusapparatuur moet kleiner zijn (in doorsnede) dan het gat in de hoofdspiegel. Met de moderne CCD's kan dat; opzij van de inkomende bundel en achter de spiegel is plaats voor grotere apparatuur. De SVST is een vacuumrefractor met een heliostaat. Naar mijn smaak staat hij te dicht bij de rand van de Caldeira, een 2000 m diepe afgrond net ten zuiden er van. Bij onvoldoende wind stijgt turbulentie als in een schoorsteen daarlangs omhoog tot in de kijkrichting naar de zon. De DOT staat zo'n zestig meter langs de glad aflopende helling naar het noorden, met z'n spiegel 10 m onder de SVST lens. De helling is bedekt met bremstruiken (een unieke soort) die bijdraagt aan de goede seeing door vermindering van grondverhitting. De DOT en de SVST hebben gemeen dat ze slechts één afbeeldend stuk optiek hebben; THEMIS heeft 6 gekromde spiegels (en 5 vlakke plus het vacuumvenster) voor z'n focus. Bovendien ontmoeten fotonen uit de zon bij DOT en SVST het afbeeldende element als allereerste. Simpel kan het niet. Bij de DOT moet de wind de rol vervullen van het vacuum dat in THEMIS en SVST interne turbulentie nabij het focus elimineert. Dit open-telescoop principe wordt met de DOT voor het eerst uitprobeerd.

maar komt daar dichterbij dan enige andere niet-actief gecorrigeerde telescoop. Na de lens volgen twee alt-azimuth spiegels die samen de heliostaat vormen. Ze bemoeilijken polarimetrie ( $c$ ), maar bederven de beeldscherpte niet omdat ze vlak zijn (bij kromme spiegels is exacte cofocale alignering een haast onmogelijke zaak).

De SVST is ten naastenbij de eenvoudigste refractor die je kunt bedenken; die eenvoud maakt hem zo goed. Alleen valt het SVST concept niet op te schalen naar grotere apertuur: lenzen van meer dan een halve meter en toch uitmuntende kwaliteit zijn onbetaalbaar. Het beste aan de SVST is echter eis  $k$  in de persoon van Göran Scharmer, naar mijn smaak een genie. Hij is hard bezig met stap  $d$ .

## DOT

Tenslotte kort de DOT. Hij staat op een goede plek ( $a$ ) en heeft geen koepel die de lokale seeing kan bederven ( $b$ ). De hele constructie is erop gericht de lokale luchtstroming niet te verstoren. De open toren tilt de telescoop uit boven de turbulente laag van door zonnestraling onstane convectie nabij de grond. Omdat de beste seeing op La Palma vooral voorkomt bij harde wind (uit noordelijke richtingen waarin de passaat gladjes over de vulkaankegel wordt omhoog geleid) levert het ontbreken van een koepel voldoende luchtstroom dwars door de telescoop zelf om die ook schoon te blazen. Ook wordt er voor gezorgd dat er geen lokale warmtebronnen zijn, ondermeer door toepassing van een watergekoeld diafragma dat het niet-gebruikte zonlicht wegspiegelt. De hele santekraam is uitzonderlijk stijf om te zorgen dat de telescoop nauwkeurig

volgt, ook in harde wind. De DOT optiek voert het reflector-concept tot de ultieme eenvoud: een enkele paraboolspiegel (die niet aberreert, 't is een goede) in een meedraaiende parallactische opstelling, en dan meteen de postfocus apparatuur, met prima polarimetriemogelijkheden en zonder beeldrotatie.

Als het principe van de open telescoop volgens verwachtingen werkt staan de scherpste spiegelkijker en de scherpste lenzenkijker ter wereld broederlijk op La Palma naast elkaar<sup>6</sup>. De DOT heeft daarbij als toekomstperspectief het voordeel dat vergroting van de apertuur tot 80 cm relatief eenvoudig is; daarmee kan de DOT snel uitgroeien tot een der grootste zonnetlescopen, met navenant grotere gevoeligheid en ook hogere resolutie wanneer de methodes van stap  $d$  volwassen worden. Meer over deze aspecten, over postfocusapparatuur en over de onderzoeksplannen in een volgend nummer.

Als slotopmerking nog een verwijzing naar de laatste eis,  $k$ . De DOT vergt bekwame vakidioten. Voor JOU een mogelijkheid af te studeren en te promoveren door aan het front van onderzoek de zon te observeren en te analyseren.

Ik dank Felix Bettonvil, Jan Kuijpers, Nick Schutgens en Alfred de Wijn voor verbeteringen.

---

<sup>6</sup>Als Siamese tweeling; de DOT wordt vanuit het SVST-gebouw bediend met de controlecomputers naast elkaar. Dat betekent dat het beproeven van het open-telescoop concept in directe, real-time vergelijking met de SVST gedaan kan worden. Daarnaast zijn tandem-operaties heel aantrekkelijk.